

AUTORES: Amaya García Pérez (Universidad de Salamanca), Álvaro García Pérez (Grupo de Investigación Babel, Fundación IMDEA Software, Madrid, España).

La afinación de la flauta tradicional salmantina de tres agujeros¹

Resumen: Actualmente hay una notable carencia de estudios cuantitativos y sistemáticos sobre sistemas de afinación en la música tradicional española. La flauta de tres agujeros reviste especial interés en este sentido. La afinación de este tipo de instrumentos está muy determinada por su morfología. Al disponer solo de tres agujeros, su afinación está mucho más limitada que la de otros instrumentos. Debido a estos condicionantes morfológicos, la afinación de estas flautas preserva sistemas de afinación tradicionales anteriores al uso generalizado del temperamento igual.

En este trabajo pretendemos hacer un estudio cuantitativo de la afinación de las flautas de tres agujeros de la provincia de Salamanca que nos permita establecer parámetros de afinación comunes a todas ellas. Para ello se ha requerido tanto un análisis musicológico como un estudio físico-matemático. Se han grabado flautas de las colecciones de Joaquín Díaz y Cid Cebrián. A estas muestras se les ha aplicado un análisis espectral para determinar cuantitativamente cada uno de sus tonos y, lo que es más importante, la relación interválica entre ellos. Posteriormente se ha realizado un estudio estadístico descriptivo para determinar esos parámetros de afinación comunes.

Justificación

La flauta de tres agujeros es un aerófono de bisel. Consta de un tubo cilíndrico con boquilla en la parte superior para dirigir el aire y tres perforaciones; las dos inferiores se encuentran en la parte anterior del instrumento y la tercera se encuentra en la parte posterior. Este instrumento, acompañado normalmente del tamboril o en ocasiones del salterio, se utiliza hoy en día en la música tradicional de diferentes zonas de la Península Ibérica². Según la clasificación de Jambrina y Cid Cebrián³, existen seis focos geográficos en la península y las islas en los que podemos encontrar el conjunto de flauta y tamboril (o salterio) tocados por un mismo instrumentista. El foco más extenso es el *Occidental*, que comprende zonas de Asturias, León, Zamora, Salamanca, Tras-Os- Montes (Portugal), norte de Cáceres, sur de Badajoz, Huelva y Alentejo (Portugal).

¹ Para la realización de este estudio han sido indispensables las colaboraciones de Joaquín Díaz, quien nos ha facilitado el acceso a todos los instrumentos conservados en la fundación que lleva su nombre; a Alberto Jambrina y a José Ramón Cid Cebrián, quienes también nos han facilitado instrumentos y además han tocado para las grabaciones de sonido; y a Álvaro Málaga, que ha realizado las grabaciones de sonido utilizadas en el trabajo. Este proyecto ha sido en parte subvencionado por la Consejería de Familia e Igualdad de Oportunidades de la Junta de Castilla y León.

² El instrumento recibe nombres diversos dependiendo del lugar: flauta, gaita, flabiol, chiflo, pito, fobiol...

³ JAMBRINA LEAL, Alberto / CID CEBRIÁN, José Ramón: *La gaita y el tamboril*, Centro de Cultura Tradicional, Diputación de Salamanca, 1989, 15.



Fig. 1: Flauta salmantina de la colección de la Fundación Joaquín Díaz

En este trabajo de investigación estudiaremos la afinación de estos instrumentos de una forma sistemática y cuantitativa, centrándonos en flautas de la zona occidental. Nuestra muestra de estudio comprende flautas de dos colecciones: la colección de la Fundación Joaquín Díaz en Urueña (Valladolid) y la colección privada de José Ramón Cid Cebrián en Ciudad Rodrigo (Salamanca). En concreto nos centraremos en las flautas procedentes de la zona de Salamanca, las más numerosas de estas colecciones. Los ejemplares estudiados han sido 21⁴.

El estudio de las flautas de tres agujeros en la música tradicional es sumamente interesante ya que este instrumento, debido a su antigüedad⁵ y a sus particulares características morfológicas, ha hecho pervivir elementos de la música de tradición oral que de otra manera no hubieran sobrevivido al verse sustituidos por otra forma más moderna de hacer música. Entre esos elementos que han pervivido con las flautas se encuentra, como uno de los más interesantes sin duda, la afinación.

Los trabajos ya existentes que proponen descripciones de la afinación de estos instrumentos lo hacen siempre de una forma cualitativa, no sistemática, y en ocasiones con términos poco precisos. Una buena síntesis de las propuestas principales ya existentes de descripción de la afinación de la flauta tradicional de tres agujeros es la que aparece en el ya citado libro de

⁴ La colección de la Fundación Joaquín Díaz consta de 22 ejemplares: 11 salmantinas (utilizadas para este estudio), 2 extremeñas, 5 leonesas, 1 de Tras-Os Montes, 1 de Huelva, 1 de Ibiza y 1 aragonesa. De la colección de Cid Cebrián hemos estudiado 10 ejemplares procedentes de la provincia de Salamanca.

⁵ El conjunto de flauta de tres agujeros y tamboril podemos encontrarlo con frecuencia en muchas fuentes iconográficas y textuales europeas desde la Edad Media. Aparece, por ejemplo, en las miniaturas de las cantigas de Alfonso X del siglo XIII, en las descripciones organológicas de Mersenne del siglo XVII, en numerosas ilustraciones de códices medievales y renacentistas, etc.

JAMBRINA/CID (pp. 21-25)⁶. Para Dámaso Ledesma⁷, por ejemplo, la gaita salmantina tendría la afinación de la antigua escala griega de Terpandro⁸. Para García Matos⁹, las flautas cacereñas englobarían los modos dórico e hipodórico griegos, pero transportados a la escala de La. En otras descripciones se habla de sonidos ambiguos o intermedios (Si bemol un poco alto, Fa sostenido un poco bajo etc.)

Como vemos, estas descripciones adolecen de falta de precisión y además utilizan términos poco apropiados para la descripción de un sistema de afinación. Como ya señalaban Jambrina y Cid en su citado estudio, ¿tiene sentido describir estos sistemas de afinación en términos de modos griegos? Los modos griegos presentan sistemas de afinación muy diversos en las diferentes fuentes que se han conservado, por lo que los términos “escala de Terpandro”, “modo dórico” o “modo hipodórico” (o cualquier otro) no pueden ser identificativos de un sistema de afinación concreto. ¿A qué sistema de afinación se refiere García Matos al hablar de “modo dórico”? ¿Al del modo dórico descrito por Aristoxeno, al descrito por Ptolomeo, al descrito por Platón? En realidad no se refiere a ninguno de ellos, sino que remite a lo que la tradición pedagógica sobre teoría de la música ha convertido en modo dórico: una escala de Mi. Pero aún así, poco nos dice sobre su afinación, ya que una escala de Mi puede estar afinada en temperamento igual, en la justa entonación de Ramos de Pareja, en algún tipo de temperamento mesotónico, etc. De la misma manera, ¿qué rigor presenta una descripción en términos de “si bemol un poco alto” o “fa sostenido un poco bajo”?

Por otra parte, estas descripciones centran su interés en la altura absoluta de los sonidos, se fijan en si el instrumento comienza en La, en Sol o en la nota que sea. Nosotros consideramos

⁶ Una descripción posterior al estudio de JAMBRINA/CID es: OLIVEIRA, Ernesto Veiga de: *Instrumentos musicais populares portugueses*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2000, donde se habla de la flauta alentejana.

⁷ LEDESMA, Dámaso: *Folk-lore o Cancionero salmantino*, reed., Imprenta provincial, Salamanca, 1972.

⁸ Terpandro fue un músico griego del siglo VI antes de Cristo al que se le atribuye la invención de la lira de siete cuerdas. Normalmente se atribuye a esta lira la afinación de la octava central del modo dórico, y esta octava, en el género diatónico, se aproximaría a una escala de Mi. Dámaso Ledesma llama a este personaje Herpandro; sin duda se trata de un error.

⁹ GARCÍA MATOS: *Lírica Popular de la Alta Extremadura*, Unión Española, Madrid, 1944.

que ese aspecto es poco interesante. Estos instrumentos no suelen tocar en formaciones con más instrumentos melódicos o armónicos, por lo que la altura absoluta de los sonidos no tiene ningún valor real. De hecho se pueden encontrar flautas de diferentes tamaños y tesituras. Lo que sí que tiene un valor real es la afinación relativa entre los sonidos que produce cada flauta, es decir, la interválica.

Estas descripciones siempre se plantean en términos del temperamento igual¹⁰, por lo que muchos de los sonidos se suelen describir como “ambiguos”, “indeterminados” o “neutros”¹¹. Ciertamente son indeterminados, pero no de forma absoluta, sino solo en relación al temperamento igual. Nuestro planteamiento es que esos sonidos presentan una afinación precisa, pero no en el temperamento igual.

También podemos encontrar la opinión generalizada de que estos instrumentos tradicionales no son en absoluto rigurosos en cuanto a su afinación. Parece que el hecho de que en su construcción se sigan recetas tradicionales, hace que su afinación sea sumamente variable. Se piensa comúnmente que la variación entre un instrumento y otro es tal que su sistematización se vuelve imposible. Sin embargo, nosotros estamos convencidos de que, si consideramos la interválica, esa variación no es ni mucho menos tan grande como se piensa, y que se pueden encontrar patrones generales que rigen la afinación de estos instrumentos. Asimismo, consideramos que las variaciones que puedan existir entre unos instrumentos y otros se corresponderían, probablemente, con diferentes procedencias geográficas o, tal vez, con variaciones en su construcción a lo largo del tiempo¹².

¹⁰ Cuando hablemos de temperamento en este texto, siempre nos referiremos al temperamento igual de doce sonidos por octava.

¹¹ Miguel Manzano habla de “la afinación ambigua del segundo sonido de la gaita y sus armónicos”, en el estudio musicológico que realiza como introducción a: GARCÍA MATOS/SÁNCHEZ FRAILE: *Páginas inéditas del cancionero de Salamanca*, Diputación provincial de Salamanca, 1995, p. 36.

¹² Se puede apreciar que en algunos casos los patrones tradicionales de afinación se han ido variando para adecuarlos al temperamento igual. Este tema merecería un estudio mucho más profundo del aquí presentado.

Peculiaridades morfológicas de la flauta de tres agujeros y otras consideraciones previas

La morfología de un instrumento (su longitud, el número y distancia entre agujeros, etc.) determina su afinación, por lo que es interesante reflexionar sobre este tema.

Como mencionamos anteriormente, estas flautas constan de un tubo cilíndrico en el que se realizan tres perforaciones para acortar su longitud. Las dos perforaciones inferiores se encuentran en la parte delantera del instrumento, mientras que la superior se encuentra en la parte trasera. Esta disposición de las perforaciones se corresponde con la manera de tocar el instrumento: la flauta se toca con la mano izquierda, quedando la derecha reservada para el tamboril, por lo que con una sola mano el músico tiene que ser capaz de tocar y sujetar el instrumento. El dedo pulgar tapa el agujero más alto de la parte posterior y los dedos índice y corazón cierran los otros dos agujeros. Los dedos anular y meñique se usan para sujetar el instrumento.

Al disponer únicamente de tres agujeros, estas flautas pueden producir solamente cuatro sonidos fundamentales. El sonido más grave se corresponde con la longitud del tubo completo. Destapando el agujero inferior tenemos el siguiente sonido. Con los dos agujeros inferiores destapados tendríamos otro sonido más agudo. Y con los tres agujeros destapados conseguimos el sonido más agudo¹³. Sin embargo estos sonidos fundamentales no suelen utilizarse para hacer música sino que casi siempre se recurre al uso de sus armónicos superiores.

Llamemos a las cuatro posiciones posibles de la siguiente manera: posición 0, con cero agujeros destapados; posición 1, con un agujero destapado (el agujero inferior); posición 2, con dos agujeros destapados (los dos agujeros inferiores); posición 3, con los tres agujeros destapados. E indiquemos el armónico utilizado colocando un subíndice de la siguiente

¹³ Esta es la forma tradicional de tocar estos instrumentos, al menos en la zona de León, Zamora, Salamanca y Cáceres. Hoy en día existen también otras digitaciones más modernas (con agujeros medio tapados o digitaciones cruzadas) para conseguir cromatismos.

manera: subíndice 0, sonido fundamental en esa posición; subíndice 1, primer armónico en esa posición, subíndice 2, segundo armónico en esa posición; subíndice 3, tercer armónico en esa posición.

Con independencia de la distancia a la que se encuentren los agujeros entre sí, todos los sonidos producidos por la misma posición son armónicos del sonido fundamental de esa posición. De esta forma, los sonidos con subíndice 1 se encuentran a distancia de octava de los sonidos con subíndice 0. Los sonidos con subíndice 2 se encuentran a distancia de quinta de los sonidos con subíndice 1 y los sonidos con subíndice 3 se encuentran a distancia de cuarta de los sonidos con subíndice 2 (o lo que es lo mismo, a distancia de octava de los sonidos con subíndice 1).

La gama de sonidos que producen estas flautas es: $0_0, 1_0, 2_0, 3_0, 0_1, 1_1, 2_1, 3_1, 0_2, 1_2, 2_2, 0_3, 1_3, 2_3, 1_4$. Los sonidos con subíndice 0 no se utilizan normalmente para hacer música, por lo que no los tendremos en cuenta en este trabajo. Por otro lado, no todas las flautas producen fácilmente los sonidos más agudos, por lo que en algunas flautas falta algún sonido de subíndice 3. Por todo ello en este trabajo nos centraremos en la octava central comprendida entre los sonidos 0_1 - 0_3 . En cualquier caso, los sonidos descartados no son, en principio, más que duplicaciones a distancia de octava de los sonidos de la octava central.

De la manera de producir esta gama de sonidos ya se desprenden datos precisos sobre su afinación: como hemos dicho, todos los sonidos producidos por la misma posición son armónicos del sonido fundamental de esa posición, por lo que dentro de la octava central nos encontramos con que, en condiciones ideales, los intervalos 0_1 - 0_2 , 1_1 - 1_2 y 2_1 - 2_2 serían quintas justas¹⁴.

Por otra parte, la forma tradicional de construcción de estas flautas, al menos en las zonas de Salamanca y Cáceres, es utilizando las “medidas del pastor”. Según estas medidas, la longitud

¹⁴ En condiciones ideales estos intervalos serían quintas no temperadas, de 702 cents, pero un instrumento real no siempre presenta condiciones ideales, por lo que el intervalo resultante puede variar algo respecto a este ideal.

de la flauta es de dos cuartas y las distancias entre agujeros y entre el último agujero y el extremo inferior de la flauta deben ser iguales. Esta distancia se correspondía tradicionalmente con la falange corta del pulgar del constructor¹⁵.

Una primera aproximación a la afinación de estos instrumentos proviene de la simple sensación acústica. A partir de esta sensación se percibe claramente en todas las flautas, que tomando como referencia el sonido grave de la octava central del instrumento (sonido 0_1) nos encontramos con una octava (0_1-0_3) y una quinta justa (0_1-0_2), lo que se corresponde perfectamente con los datos ideales que se desprenden de la morfología del instrumento. Pero además, también resulta evidente a partir de la percepción, que en todas las flautas se establece un intervalo de cuarta justa (0_1-3_1). Esto significa que el agujero superior está colocado de tal manera que aproximadamente debe acortar el tubo sonoro en $1/4$ de su longitud. De esta forma el tubo completamente destapado tiene una longitud aproximada de $3/4$ del tubo completo, produciendo así un sonido una cuarta más agudo que el sonido del tubo completo.

A efectos de visualizar fácilmente todo este tema, a lo largo de este trabajo vamos a imaginar que todas las flautas están afinadas en La, es decir, que el sonido 0_1 es un La¹⁶. Entonces encontramos que todas las flautas presentan los sonidos e intervalos: *La-cuarta-Re-ono-Mi-cuarta-La*.

La octava central se encuentra, por tanto, formada por dos tetracordios iguales entre sí (con los mismos intervalos internos) y separados por un tono: la cuarta 0_1-3_1 y la cuarta 0_2-0_3 .

Sin embargo, los sonidos que dividen la cuarta La-Re y la cuarta Mi-La (los sonidos 1_1-2_1 , 1_2-2_2) no están claramente definidos, aunque como hemos dicho, las dos cuartas deben estar

¹⁵ JAMBRINA/CID, Op. cit. p. 77. Ver también páginas 83 y 85. Hoy en día, en el Taller de instrumentos del Centro de Cultura Tradicional de la Diputación de Salamanca, construyen las flautas de 40 cm. de largo y la distancia entre agujeros es de 3 cm. García Matos también habla de la colocación de los agujeros a distancias iguales entre sí en las flautas cacereñas.

¹⁶ Imaginar las flautas afinadas en La es una ayuda para visualizar mejor el tema, pero no significa en absoluto que todas las flautas se afinen en La. Como ya dijimos, hay flautas de diferentes tamaños y tesituras.

divididas de la misma manera. Es decir, en condiciones ideales 1_1 - 1_2 sería una quinta y 2_1 - 2_2 otra quinta.

Para una flauta afinada en La estos sonidos son normalmente descritos de la siguiente manera:

- 1_1 : Como Si bemol o como Si natural (o como un sonido ambiguo intermedio).
- 2_1 : Como Do natural o Do sostenido (o como un sonido ambiguo intermedio).
- 1_2 : Como Fa natural o Fa sostenido (o como un sonido ambiguo intermedio).
- 2_2 : Curiosamente siempre es descrito como Sol, y nunca como Sol sostenido, a pesar de que parece que debería formar una quinta justa con respecto a 2_1 cuando este segundo es descrito como Do sostenido.

Otro dato observable a partir de la simple percepción es que las flautas procedentes de la zona de Salamanca y Cáceres presentan estos sonidos intermedios más graves que las flautas procedentes de la zona de León. Es decir, en una flauta de Salamanca afinada en La, el Si “parece tender” hacia el bemol o hacia un sonido intermedio entre el bemol y el natural, y el Do “parece” natural aunque algo alto; mientras que en una flauta leonesa el Si “parece” natural y el Do “parece tender” hacia el sostenido o un sonido intermedio entre el natural y el sostenido. No obstante, en este estudio nos ceñiremos al caso de las flautas salmantinas, dejando de lado flautas procedentes de otras zonas.

Planteamiento de hipótesis de trabajo

De todo lo expuesto hasta el momento podemos plantear varias hipótesis de trabajo que intentaremos demostrar a partir del estudio cuantitativo:

- A pesar de que estos instrumentos son contruidos de forma tradicional no muy precisa, existen patrones que rigen la afinación de estas flautas. Estos patrones no se corresponden en absoluto con el temperamento igual de doce sonidos por octava. Un instrumento particular puede desviarse algo de ese patrón, pero la media de un grupo de instrumentos relativamente

numeroso debe adaptarse a él. Al ser la construcción más imprecisa que en un instrumento profesional, la variación con respecto al patrón puede ser en ocasiones considerable, lo cual no quita que el ideal de afinación sea ese patrón. Los instrumentos tradicionales también pueden estar “desafinados”, es decir, alejados de su patrón ideal de afinación. Estos patrones de afinación parecen estar determinados por diferentes procedencias geográficas, por lo que nos ceñiremos a las flautas procedentes de la provincia de Salamanca.

- Estas flautas producen una sensación sonora, para una flauta en La, de Si bemol alto y Do ligeramente alto. Es decir, el sonido 1_1 es indeterminado en el temperamento igual¹⁷, encontrándose a distancia de entre un semitono y un tono con respecto a 0_1 . Y el sonido 2_1 también muestra una cierta indeterminación (aunque no tan acusada), encontrándose a una distancia algo mayor a una tercera menor temperada con respecto al sonido 0_1 . El sonido 3_1 parece formar una cuarta justa con respecto al sonido 0_1 . Lo mismo ocurre con el tetracordio superior de la octava central (sonidos 0_2 , 1_2 , 2_2 , 0_3).

Estas flautas están construidas tradicionalmente con distancias iguales entre agujeros y entre el último agujero y el final del tubo. Asimismo, hemos dicho que 3_1 forma una cuarta con respecto a 0_1 . En condiciones ideales estos presupuestos determinarían unas relaciones de longitud de tubo sonoro (figura 2), y por tanto de frecuencia, concretas para cada intervalo.



Fig. 2

¹⁷ Usaremos el término indeterminación para referirnos a sonidos no medibles en el temperamento igual de 12 sonidos por octava, aunque ya hemos mencionado que no creemos que estos sonidos sean indeterminados de forma absoluta; simplemente son sonidos determinados en otro sistema.

En las siguientes tablas se pueden ver esas proporciones entre frecuencias así como su expresión en *cents*¹⁸:

Intervalos	Relación entre frecuencias ¹⁹	Cents
0 ₁ /1 ₁ (La-Si) ²⁰	11/12	151
0 ₁ /2 ₁ (La-Do)	5/6	316
0 ₁ /3 ₁ (La-Re)	3/4	498
0 ₁ /0 ₂ (La-Mi)	2/3	702
0 ₁ /1 ₂ (La-Fa)	11/18	853
0 ₁ /2 ₂ (La-Sol)	20/33	1018
0 ₁ /0 ₃ (La-La)	2/1	1200

Tabla 1: Intervalos desde el sonido grave 0₁

Intervalos	Relación entre frecuencias	Cents
0 ₁ /1 ₁ (La-Si)	11/12	151
1 ₁ /2 ₁ (Si-Do)	10/11	165
2 ₁ /3 ₁ (Do-Re)	9/10	182
3 ₁ /0 ₂ (Re-Mi)	9/8	204
0 ₂ /1 ₂ (Mi-Fa)	11/12	151
1 ₂ /2 ₂ (Fa-Sol)	10/11	165
2 ₂ /0 ₃ (Sol-La)	9/10	182

Tabla 2: Intervalos consecutivos

Tetracordio inferior		Tetracordio superior	
Intervalos	(cents)	Intervalos	(cents)
0 ₁ /1 ₁ (La-Si)	151	0 ₂ /1 ₂ (Mi-Fa)	151
0 ₁ /2 ₁ (La-Do)	316	0 ₂ /2 ₂ (Mi-Sol)	316
0 ₁ /3 ₁ (La-Re)	498	0 ₂ /0 ₃ (Mi-La)	498
1 ₁ /2 ₁ (Si-Do)	165	1 ₂ /2 ₂ (Fa-Sol)	165
1 ₁ /3 ₁ (Si-Re)	347	1 ₂ /0 ₃ (Fa-La)	347
2 ₁ /3 ₁ (Do-Re)	182	2 ₂ /0 ₃ (Sol-La)	182

Tabla 3: comparación entre tetracordio inferior (La-Re) y tetracordio superior (Mi-La)

Como se puede observar en las tablas, según nuestra hipótesis la afinación relativa de los sonidos de los tetracordios inferior y superior sería la misma.

Estudio cuantitativo

A partir de las 21 flautas grabadas hemos llevado a cabo el siguiente proceso:

¹⁸ Un *cent* equivale a una 1200-ava parte del intervalo de octava justa. Es decir, en el temperamento igual de 12 semitonos por octava: semitono = 100cents, tono = 200cents, tercera menor = 300cents, tercera mayor = 400cents, cuarta = 500cents, quinta = 700cents etc.

¹⁹ Estas relaciones entre frecuencias se desprenden de las relaciones entre longitudes de tubo sonoro que resultan al colocar el agujero 3 para conseguir una cuarta justa (es decir, a 1/4 del extremo inferior del tubo) y dividir posteriormente esa distancia en tres partes iguales para colocar los otros dos agujeros, tal y como aparece en la figura 2.

²⁰ Como hemos dicho anteriormente, podemos imaginar una hipotética flauta afinada en La. Las notas de esa flauta son las que aparecen entre paréntesis en las tablas para hacer más fácil la visualización de la escala, lo que en absoluto implica que sean esas notas concretas, ni los intervalos entre ellas, los que se desprenden de nuestra hipótesis. De hecho, según nuestra hipótesis, el Si se hallaría a medio camino entre el bemol y el natural, y el Fa se hallaría entre el natural y el sostenido.

1. Se ha determinado cuantitativamente la afinación de cada flauta. Para ello se ha hallado la frecuencia fundamental de cada sonido de la octava central de cada flauta estudiada mediante un análisis espectrográfico descrito a continuación.
2. Se ha calculado en *cents* los intervalos que se producen entre los diferentes sonidos de cada flauta.
3. Se ha hecho un estudio estadístico descriptivo promediando los valores interválicos de las 21 flautas, para de esta manera establecer un patrón de afinación interválico.

Determinación cuantitativa de la afinación de cada flauta

Para determinar la afinación de las flautas estudiadas hemos aplicado técnicas de análisis espectral. Se ha grabado una escala ascendente y descendente, deteniéndonos en cada sonido un par de segundos, recorriendo toda la tesitura de cada una de las flautas. Las grabaciones se han realizado con un micrófono direccional con una respuesta constante en la banda de frecuencia audible (aproximadamente de 20Hz a 20000Hz) y una atenuación muy grande fuera de esa banda. Posteriormente se han almacenado en formato *wav*, que representa la señal acústica en *Pulse Code Modulation* (PCM) sin compresión, con una *frecuencia de muestreo* de 44100 medidas por segundo y una cuantificación de 16 bits. Esta es la calidad estándar del formato CD Audio²¹.

Se han extraído fragmentos de aproximadamente un segundo de duración por cada sonido de cada flauta, en donde la afinación era más estable. Estos fragmentos han servido para alimentar el algoritmo de análisis espectral. El método utilizado es una variante de *Blackman-Tukey*²². Se ha aplicado primero el algoritmo de *transformada rápida de Fourier* (*Fast Fourier Transform* o FFT) a la señal, que la traslada del dominio del tiempo al dominio de la

²¹ WIKIPEDIA. *CD audio*, Wikimedia Foundation, Inc. Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Cd_audio. 1-10-2008.

²² NEWLAND, D. E.: *Vibraciones aleatorias y análisis espectral*, AC, Madrid, 1983.

frecuencia, obteniendo un espectrograma. Éste da idea de la cantidad de energía que la señal acústica transmite en cada frecuencia. Posteriormente se ha aplicado un alisado (cada medida se obtiene promediando varias medidas adyacentes) para mejorar la fiabilidad estadística de la estimación del espectrograma de la señal. El resultado es un conjunto de medidas espectrales que determinan la amplitud de las frecuencias sinusoidales puras que sumadas resultan en la señal original²³.

El *teorema de muestreo*²⁴ determina que se debe utilizar una frecuencia de muestreo de al menos el doble de la *máxima frecuencia discernible*, para que no haya pérdidas de información en el proceso de análisis espectral. Además es necesario aplicar un filtro pasabajo para que no se produzca el fenómeno de *aliasing*²⁵. En nuestro caso la frecuencia de muestreo es de 44100Hz, por lo que en el espectrograma solo podremos discernir frecuencias inferiores a 22050Hz. No se ha realizado filtrado ya que la respuesta del transceptor (micrófono) es despreciable para frecuencias superiores a 22050, garantizando la ausencia de *aliasing*.

El número de medidas de cada fragmento también es importante, ya que coincide con el número de medidas espectrales. Cuanto mayor sea el número de medidas espectrales mayor será la definición de dichas medidas (podremos diferenciar componentes de frecuencia muy próximas entre sí). El algoritmo FFT trabaja de forma óptima para fragmentos con un número de medidas potencia de dos, por lo tanto hay que intentar tomar la máxima potencia de dos que resulte en una duración menor que la de los fragmentos de los que se dispone. Las imperfecciones de las flautas impiden en algunos casos contar con muestras superiores a medio segundo. Por tanto el número de medidas más ajustado para este caso es de 2^{14} (

²³ WIKIPEDIA. *Fourier theorem*. Wikimedia Foundation, Inc. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_theorem. 1-10-2008.

²⁴ WIKIPEDIA. *Nyquist-Shannon sampling theorem*. Wikimedia Foundation, Inc. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling_theorem. 1-10-2008.

²⁵ WIKIPEDIA. *Aliasing*. Wikimedia Foundation, Inc. Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Aliasing>. 1-10-2008.

16384), obteniendo así fragmentos de duración 0,372s. De esta forma se tienen 16384 medidas espectrales que se reparten sobre la totalidad del soporte $[-22050\text{Hz} - 22050\text{Hz}]$ (la máxima frecuencia discernible según el teorema de muestreo y su negativa). Nos basta con tomar la mitad positiva del soporte, ya que la negativa es simétrica (el algoritmo la obtiene por congruencia matemática) y no es informativa. Contamos con 8192 muestras en el rango de frecuencias $[0\text{Hz} - 22050\text{Hz}]$. Esto hace que la definición sea de $22050\text{Hz}/8192 = 2,69\text{Hz}$, es decir, cada medida espectral está separada 2,69Hz de las medidas adyacentes.

La transformada de Fourier toma un periodo completo de una señal periódica continua y la transforma en un espectro discreto de pulsos que se corresponden con los armónicos de la frecuencia más pequeña (la que tiene como periodo la totalidad de la muestra). Sin embargo esta interpretación cambia si se trata de una señal aperiódica, como es nuestro caso. Cada medida espectral representa la suma integral de la energía transmitida por dicha señal, en una banda de 2,69Hz de anchura. Estas bandas se sitúan en los intervalos de frecuencia $[n \times 2,69\text{Hz}, (n+1) \times 2,69\text{Hz}]$, siendo n el número de medida, que varía desde 0 hasta $(2^{14}-1)$. La totalidad de las bandas recorren la mitad positiva del soporte $[0\text{Hz} - 22050\text{Hz}]$.

El alisado permite mejorar estadísticamente la fiabilidad del espectrograma. Éste representa una función de densidad espectral (el área por debajo del espectrograma para un intervalo de frecuencias se corresponde con la energía de la señal en dicho intervalo). El valor de una muestra individual es poco informativo, ya que la densidad espectral para un único punto es errática y no proporciona demasiada información (la longitud del intervalo sobre el que calculamos el área tiende a cero, el área bajo la curva también tiende a cero y el cociente entre ambas no está definido en el límite). Intuitivamente, si el espectrograma es muy rugoso (presenta picos y cambios muy abruptos) el valor de una medida espectral individual tiene muy poca fiabilidad estadística, mientras que un valor promediado de varias medidas

adyacentes (eliminando picos y haciendo los cambios más suaves) representará con mayor fiabilidad estadística el valor real de la energía para una frecuencia determinada (Figura 3).

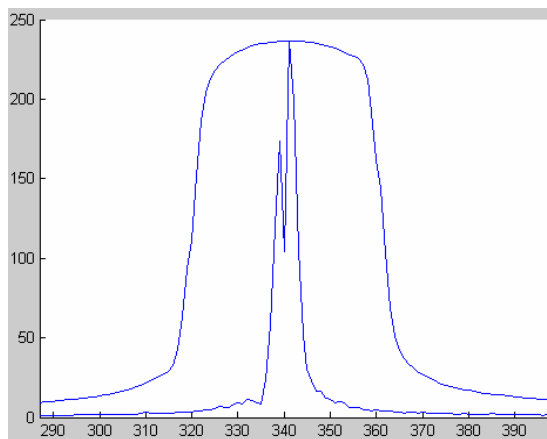


Fig. 3: Espectrograma alisado y sin alisar de un fragmento.

La contrapartida del alisado es que si la señal original presenta componentes frecuenciales que estén muy próximas entre sí, éstas pueden ser indistinguibles. Se observará un único lóbulo o pico de mayor anchura, en vez de dos picos individuales. Esto puede redundar en una pérdida de definición, en el siguiente sentido: será difícil diferenciar dos componentes frecuenciales de la señal original que estén próximas entre sí. Sin embargo, debido a las peculiaridades del algoritmo utilizado para determinar la posición de la componente fundamental (se explicará en breve), el alisado proporciona estimaciones de la posición (el lugar donde se encuentra el máximo local para cada lóbulo del espectro) mucho más precisas. Se ha realizado un alisado de 20 medidas adyacentes a cada lado de la medida central (en total 41 medidas). Como las componentes de nuestra señal musical (tono fundamental y sus armónicos) están lo suficientemente alejadas entre sí, no hay pérdida de definición aunque se promedie un número muy grande de muestras.

El algoritmo de determinación del tono musical devuelve la posición de la medida espectral cuyo valor sea el máximo global del espectrograma. Estamos analizando sonidos musicales, por lo que el espectro consistirá (salvo ruidos e imperfecciones) en un pico muy grande para la frecuencia fundamental y otros picos que se van atenuando conforme ascendemos en la

serie armónica. El algoritmo determina en qué lugar se encuentra el pico correspondiente a la frecuencia fundamental, o dicho de otro modo, cuál es la frecuencia fundamental y cuál es el tono musical del fragmento. Se ha comprobado (visual y auditivamente) que este algoritmo tiene suficiente fiabilidad, ya que los sonidos registrados tienen una calidad musical suficiente como para que no haya sobretonos con mayor potencia que la frecuencia fundamental ni otros ruidos o distorsiones que hiciesen inaplicable dicho algoritmo.

El error en la determinación del tono es de 2,69Hz, que es la separación entre cada medida espectral. El tono es una magnitud relativa (el intervalo entre un sonido de 100Hz y otro de 200Hz no es el mismo que el intervalo entre un sonido de 500Hz y otro de 600Hz), luego ese error absoluto varía dependiendo del tono de cada fragemento. En nuestro caso se cuenta con medidas tonales que varían desde una frecuencia de 764,43Hz hasta 1717,3Hz. El error medio estimado para ese rango de frecuencias es de 1,7cents.

Resultados

Comparemos los resultados obtenidos con el modelo propuesto por nuestra hipótesis:

Intervalos	Resultados obtenidos (cents)	Modelo propuesto (cents)
0 ₁ /1 ₁ (La-Si)	150,2	151
0 ₁ /2 ₁ (La-Do)	320,9	316
0 ₁ /3 ₁ (La-Re)	499,7	498
0 ₁ /0 ₂ (La-Mi)	703,5	702
0 ₁ /1 ₂ (La-Fa)	849,3	853
0 ₁ /2 ₂ (La-Sol)	1013,2	1018
0 ₁ /0 ₃ (La-La)	1212,5	1200
<i>Tabla 4: Intervalos desde el sonido grave 0₁</i>		

Intervalos	Resultados obtenidos (cents)	Modelo propuesto (cents)
0 ₁ /1 ₁ (La-Si)	150,2	151
1 ₁ /2 ₁ (Si-Do)	170,7	165
2 ₁ /3 ₁ (Do-Re)	178,7	182
3 ₁ /0 ₂ (Re-Mi)	203,8	204
0 ₂ /1 ₂ (Mi-Fa)	145,8	151
1 ₂ /2 ₂ (Fa-Sol)	163,9	165
2 ₂ /0 ₃ (Sol-La)	199,3	182
<i>Tabla 5: Intervalos consecutivos</i>		

Tetracordio inferior (La-Re)		Tetracordio superior (Mi-La)		Modelo propuesto (cents)
Intervalos	Resultados obtenidos (cents)	Intervalos	Resultados obtenidos (cents)	
0 ₁ /1 ₁ (La-Si)	150,2	0 ₂ /1 ₂ (Mi-Fa)	145,8	151
0 ₁ /2 ₁ (La-Do)	320,9	0 ₂ /2 ₂ (Mi-Sol)	309,7	316
0 ₁ /3 ₁ (La-Re)	499,7	0 ₂ /0 ₃ (Mi-La)	509,0	498
1 ₁ /2 ₁ (Si-Do)	170,7	1 ₂ /2 ₂ (Fa-Sol)	163,9	165
1 ₁ /3 ₁ (Si-Re)	349,4	1 ₂ /0 ₃ (Fa-La)	363,2	347
2 ₁ /3 ₁ (Do-Re)	178,7	2 ₂ /0 ₃ (Sol-La)	199	182
<i>Tabla 6: comparación entre tetracordio inferior (La-Re) y superior (Mi-La)</i>				

Intervalos	Resultados obtenidos (cents)	Modelo propuesto (cents)
0 ₁ /0 ₂ (La-Mi)	703,5	702
0 ₁ /0 ₃ (La-La)	1212,5	1200
1 ₁ /1 ₂ (Si-Fa)	699	702
2 ₁ /2 ₂ (Do-Sol)	692,2	702
<i>Tabla 7: Armónicos de las posiciones 0, 1 y 2</i>		

A partir de estas tablas podemos comprobar que:

- En general, los resultados obtenidos se adaptan bastante bien al modelo propuesto.
- En concreto la posición 3₁ determina, con mucha aproximación, una cuarta con respecto a 0₁, tal y como habíamos planteado en nuestro modelo.
- A pesar de la buena aproximación general al modelo, el comportamiento de los intervalos no es exactamente igual en el tetracordio grave y en el tetracordio agudo.

Los armónicos de la posición 0 tienden hacia el agudo. Así encontramos que los sonidos 0₂ y 0₃ son más agudos de lo que cabría esperar (Tabla 7). Esto ocurre sobre todo en 0₃, que debería formar un intervalo de octava perfecta con respecto a 0₁ (1200 cents), y sin embargo se desplaza hacia el agudo 12,5cents. Por otro lado los armónicos de las posiciones 1 y 2 tienden hacia el grave (Tabla 7). Es decir, 1₂ y 2₂ no forman una quinta justa de 702cents con los correspondientes sonidos en el tetracordio grave, sino algo menos. Esto es especialmente

evidente en el caso de la posición 2: 2_2 forma con respecto a 2_1 un intervalo de $692,2cents$ en lugar de los $702cents$ que corresponden a una quinta justa²⁶.

Esta desigualdad en el comportamiento de los armónicos de diferentes posiciones conlleva que los intervalos $0_2/1_2$ y $0_2/2_2$ sean más pequeños que sus correspondientes en el tetracordio grave, y que los intervalos $1_2/0_3$ y $2_2/0_3$ sean más grandes (Tabla 6). Por tanto, la hipótesis planteada de la igualdad de los dos tetracordios no se confirma plenamente, y esto, como veremos, presenta consecuencias interesantes.

Conclusiones

Hemos comprobado que existe un patrón de afinación de las flautas salmantinas que no se corresponde en absoluto con el temperamento igual, lo que puede evidenciar su antigüedad. Este sistema parece derivar simplemente de la sencillez en la construcción: el tercer agujero se coloca para producir una cuarta justa (intervalo básico de todos los sistemas de afinación por su gran grado de consonancia²⁷), y los otros dos agujeros se colocan simplemente a distancias iguales entre sí.

Es interesante reflexionar sobre las consecuencias musicales de la afinación de las flautas salmantinas. Hay que plantearse qué percibe un oyente actual, acostumbrado al temperamento igual de 12 sonidos por octava, cuando escucha una afinación como la de las flautas salmantinas, y qué consecuencias tiene esta percepción. Su mente, acostumbrada al sistema temperado, percibirá un intervalo no temperado asimilándolo al intervalo más cercano del temperamento igual. Así por ejemplo, si un sonido produce un intervalo de $190cents$, su oído

²⁶ La tendencia hacia el agudo de los armónicos de la posición 0 se debe probablemente a que esa posición es la del tubo completamente cerrado. La longitud total del tubo presenta entonces una abertura muy grande respecto al diámetro del tubo (el diámetro de la abertura *es* el diámetro del tubo), por lo que el aumento de presión para lograr los armónicos hace que estos se suban de afinación. Sin embargo, para las posiciones 1 y 2 el diámetro de las aberturas es bastante más pequeño que el diámetro del tubo (las aberturas son las pequeñas perforaciones para los dedos), por lo que los armónicos conseguidos tienden a bajar.

²⁷ Para una discusión sobre el grado de consonancia de los diferentes intervalos y su presencia en diferentes sistemas de afinación, ver: GARCÍA PÉREZ, Amaya: *El concepto de consonancia en la teoría musical*, Publicaciones Universidad Pontificia de Salamanca, Salamanca, 2006, pp. 20-30.

probablemente lo asimilará al sonido que produce un intervalo de 200*cents* (un tono temperado). Solamente los más dotados musicalmente, se darán cuenta de la diferencia²⁸.

Veamos entonces qué ocurriría, intervalo por intervalo, en la afinación de la flauta salmantina:

El primer intervalo del tetracordio grave ($0_1/1_1$) es de prácticamente tres cuartos de tono temperados, por lo que la sensación de indeterminación en el sistema temperado actual es total. El oyente, al percibir el sonido 1_1 , puede asimilarlo tanto al sonido grave (Si bemol para una flauta afinada en La) como al sonido agudo (Si natural), en función del contexto en el que lo escuche.

El segundo intervalo del tetracordio grave también presenta algo de indeterminación: es algo más grande (320,9*cents*) que una tercera menor temperada en el temperamento igual (300*cents*)²⁹. Para un oído moderno acostumbrado al temperamento igual sonaría seguramente, en una flauta en La, como un Do natural; aunque dependiendo del contexto musical podría sonar incluso como un Do sostenido³⁰.

En el tercer y cuarto intervalos el oído no percibe ninguna indeterminación, identificándolos como una cuarta (Re) y una quinta (Mi).

El tetracordio agudo, como hemos visto, no se comporta exactamente igual que el grave, por lo que hay que estudiarlo a parte. El primer intervalo del tetracordio agudo ($0_2/1_2$) presenta una gran indeterminación, como su correspondiente en el tetracordio grave. Consta de 145,8*cents*, por lo que el oído temperado podría asimilarlo tanto al sonido grave (Fa natural) como al sonido agudo (Fa sostenido), aunque es un poco más próximo al primero. Sin embargo, el segundo intervalo del tetracordio agudo casi no presenta indeterminación

²⁸ Este proceso psicológico es similar a lo que ocurre cuando alguien trata de repetir la pronunciación en un idioma que no conoce: asimila los fonemas desconocidos percibidos a aquellos fonemas que más se parecen en su lengua materna.

²⁹ De hecho este intervalo es prácticamente una tercera menor justa, no temperada. Es importante señalar que en el temperamento igual de doce semitonos por octava las consonancias están algo “desafinadas”. Se encuentran algo alejadas de su afinación justa, perfecta (aquella afinación en la que son más consonantes) para de esa manera poder conseguir 12 intervalos iguales por octava. Una tercera menor no temperada son 316 cents.

³⁰ Por falta de espacio en este texto actual, una discusión más detallada sobre este tema la llevaremos a cabo en un artículo posterior. En él se explicará cuándo podría ser percibido este tercer sonido de la flauta como Do sostenido, entre otras cosas, y qué consecuencias musicales conlleva esto.

ninguna. Es bastante próximo a una tercera menor temperada si tomamos como referencia el sonido grave del tetracordio ($0_2/2_2=310cents$) y muy próximo a un tono temperado si tomamos como referencia el sonido agudo ($2_2/0_3=199cents$). Por ello, el sonido 2_2 siempre sería percibido, para una flauta en La, como Sol natural.

Como podemos observar, la descripción de Dámaso Ledesma de la flauta salmantina y la descripción de García Matos de la flauta cacereña (a efectos prácticos, ambos describieron esta afinación como una escala de Mi) se corresponderían con la afinación observada en estas flautas salmantinas, asimilando los sonidos ajenos al temperamento igual a los más próximos en el temperamento igual. Es interesante señalar que estos dos grandes folkloristas eliminan la indeterminación: posiblemente más por razones de “deformación profesional” que por razones de falta de percepción musical. Es más que probable que ambos se dieran cuenta de la falta de adecuación de ciertos sonidos al temperamento igual, pero en sus descripciones de la afinación corrigen lo que seguramente interpretan como un “error” del instrumento. Sin embargo, no es el instrumento el que presenta un error, sino el oído del oyente, que no se para a escuchar lo que hay, sino que escucha lo que *a priori* quiere escuchar.

Como hemos visto, con la flauta salmantina ha sobrevivido, a pesar del constante acecho del temperamento igual, un patrón bien definido de afinación que denota prácticas musicales ancestrales. Por esta razón creemos que hay que tratar de conservar la afinación tradicional de estas flautas frente a algunas tendencias actuales que buscan su adecuación al temperamento igual.

Por otra parte, es de suponer que la peculiar afinación de las flautas de tres agujeros tiene que haber influido en el canto y en la afinación de otros instrumentos tradicionales en las zonas en las que la flauta ha pervivido. Pero no es ahora el momento de analizar esa influencia. Esta interesante cuestión la abordaremos en un artículo posterior.